



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO AMBIENTAL

**EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE REDES DE DRENAGEM PARA  
REPRESENTAÇÃO DE PADRÕES DE DISSECAÇÃO DO TERRENO**

**Vinício Coelho Lima**

BRASÍLIA, 2017.



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE REDES DE DRENAGEM PARA  
REPRESENTAÇÃO DE PADRÕES DE DISSECAÇÃO DO TERRENO**

Vinício Coelho Lima

Monografia de especialização em  
Geoprocessamento Ambiental apresentada a  
banca examinadora do Instituto de  
Geociências como exigência para a obtenção  
de título de especialista em  
Geoprocessamento.

Aprovada em: 09 /12 /2016

---

Dr. Gervásio Barbosa S. Neto (IFB-DF) (orientador)

---

Dr. Henrique Lacer Roig (IG – UnB)

---

Dr<sup>a</sup>. Tatiana Diniz Gonçalves (IG – UnB)

## **AGRADECIMENTOS**

Professor Paulo R. Meneses, pela motivação com que conduziu esse curso durante os anos.

Ao Instituto de Geociências da UnB e professores da especialização em geoprocessamento ambiental.

Professor e orientador Dr. Gervásio Barbosa B. Neto, pela amizade e apoio acadêmico.

Professora Dr<sup>a</sup> Tati Almeida.

Técnico do LSRAE Sergio Paulo Ferreira de Brito.

Aos colegas novos especialistas.

Aos colegas da seção de processamento de imagem da Topocart: Lucas, Arthur, Pedro, Maurício, Enilson, Valter e ao coordenador Samir.

Diretores de cartografia da Topocart, Maicon e Gil.

Aos amigos Enilson e Beatriz.

Minha esposa Inaiá, pela compreensão.

Meus familiares e amigos.

Muito obrigado.

Lima, V. C.; **Extração automática de redes de drenagem para representação de padrões de dissecação do terreno**. Especialização em geoprocessamento ambiental. Monografia. Instituto de Geociências. Universidade de Brasília. 2017.

## RESUMO

A variedade de algoritmos disponíveis para a extração automática de redes de drenagem a partir de MDE's, denotam que na representação de redes de drenagens superficiais existem diferentes enfoques. O objetivo desse trabalho é demonstrar, comparativamente, a sensibilidade de algumas metodologias de extração automática de redes de drenagem na representação da dissecação topográfica do relevo. Para isso comparamos drenagens extraídas de um algoritmo de oito direções de fluxo (D8) e limiar de acumulação de fluxo calculado por uma área de contribuição fixa (Af), com drenagens geradas por um algoritmo de múltiplas direções de fluxo (MFD) e limiares de área de contribuição ponderados pela declividade local (Ad) e curvatura dos vales (Ak). Verificou-se que quanto menor a dispersão dos valores para o comprimento das vertentes  $L_0$ , mais homogênea é a densidade de drenagem da rede e menor a sua conformação com as características de dissecação da área. O método que considerou a definição de uma área de contribuição de fluxo baseado na morfologia do terreno (Ak) foi o que melhor representou visualmente os diferentes padrões de dissecação da superfície, coincidindo com maior valor do coeficiente de variação do comprimento das vertentes  $L_0$ . A hidrografia da carta topográfica 1:50.000 e a drenagem Af não refletiram a diferença dos padrões de dissecação encontrados na área de estudo, levantando ressalvas sobre sua utilização para esta finalidade.

Palavras Chave: Extração automática; redes de drenagem, padrões de dissecação.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Localização da área de estudo	12
Figura 2	Plano horizontal e vertical de curvatura	14
Figura 3	Limiar de curvatura	16
Figura 4	Imagens de alta resolução do servidor Esri do ArcGis 10.1	17
Figura 5	Comparação entre as drenagens extraídas automaticamente e a carta topográfica com os padrões de dissecação apresentados pelo modelo de elevação	20
Figura 6	Coeficientes de variação CV do comprimento das vertentes para as diferentes drenagens extraídas automaticamente mais a hidrografia da carta topográfica 1:50.000.	21
Figura 7	Comparação entre o comprimento total das redes de drenagens e número de segmentos	22

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b>	Parâmetros morfométricos das drenagens extraídas automaticamente-----	19
-----------------	---	----

## LISTA DE ABREVIATURAS

AC - Área de contribuição

Ad – Área de contribuição ponderada pela declividade

Af - Área de contribuição fixa

Ak – Área de contribuição ponderada pela curvatura dos vales

CT – Carta Topográfica

CV – Coeficiente de variação

D8 – Direção de fluxo “8 vizinhos”

D<sub>d</sub> – Densidade de drenagem

ESRI - Enviromental Systems Reseach Institute

K<sub>t</sub> – Curvatura tangencial

L<sub>0</sub> – Comprimento da vertente

MDE – Modelo Digital de Elevação

MFD – Multiple Flow Direction

SIG - Sistema de Informação Geográfica

SRTM - Shuttle Topography Mission



## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO-----	10
2	ÁREA DE ESTUDO-----	12
3	MÉTODO-----	12
3.1	Método hidrológico-----	13
3.1.1	Fluxo acumulado-----	13
3.2	Morfológico-----	14
3.2.1	Curvatura tangencial-----	14
3.3	Reclassificação-----	16
3.4	Ponderação do fluxo acumulado-----	17
3.5	Densidade de drenagem e comparação dos resultados-----	17
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO-----	18
5	CONCLUSÕES-----	23
6	REFERÊNCIAS-----	24

Lima, V. C.; **Extração automática de redes de drenagem para representação de padrões de dissecação do terreno**. Especialização em geoprocessamento ambiental. Monografia. Instituto de Geociências. Universidade de Brasília. 2017.

### **Abstract**

The variety of algorithms available for the automatic extraction of drainage networks from DEMs, denote that in the representation of networks of superficial drainage there are different approaches. The objective of this work is to demonstrate, comparatively, the sensitivity of some methodologies of automatic extraction of drainage networks in the representation of topographic dissection of the relief. For this, we compared drainages extracted from an algorithm of eight flow directions (D8) and flow accumulation threshold calculated by a fixed contribution area (Af), with drains generated by a multi-flow algorithm (MFD) and thresholds of Area contribution weighted by the local slope (Ad) and curvature of the valleys (Ak). It has been found that the lower the dispersion of the values for the length of the slopes  $L_0$ , the more homogeneous is the drainage density of the lattice and the lower its conformation with the dissecting characteristics of the area. The method that considered the definition of a flow contribution area based on the terrain morphology (Ak) was the one that best represented the different surface dissection patterns, coinciding with a larger coefficient of variation of the length of the slopes  $L_0$ . The hydrography of the topography chart 1: 50,000 and the Af drainage did not reflect the difference of the dissecting patterns found in the study area, raising concerns about its use for this purpose.

## **1. Introdução**

A disponibilidade de modelos digitais de elevação (MDEs), especialmente os derivados da missão espacial SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission), deu origem à uma nova etapa na representação de redes de drenagem em Sistemas de Informações Geográficas, com acúmulo significativo de pesquisas nesta área e desenvolvimento de diversos algoritmos para a extração automática de redes de drenagem (Barták, 2009)(Tarboton et al., 1991; Montgomery e Dietrich, 1992; Dietrich et al., 1993; Dietrich e Dune, 1993; Montgomery e Foufoula-Georgiou, 1993; Dalla Fontana e Marchi, 2003; Cano, 2005; Hancock e Evans, 2006). Ainda que bastante difundida e de grande implementação na caracterização de bacias, a extração automática de redes de drenagens tem sido pauta de extensa discussão no meio

científico, notoriamente nas três últimas décadas. A variedade de algoritmos existentes para realização dessa tarefa sugere que a extração de redes de drenagem tem diferentes enfoques. Por exemplo, a quantidade de modelos para o cálculo da direção de fluxo, nos permite traçar um paralelo em que os algoritmos desenvolvidos são tantos quanto às abordagens para extração de redes de drenagens, a fim de representar a complexidade da superfície terrestre.

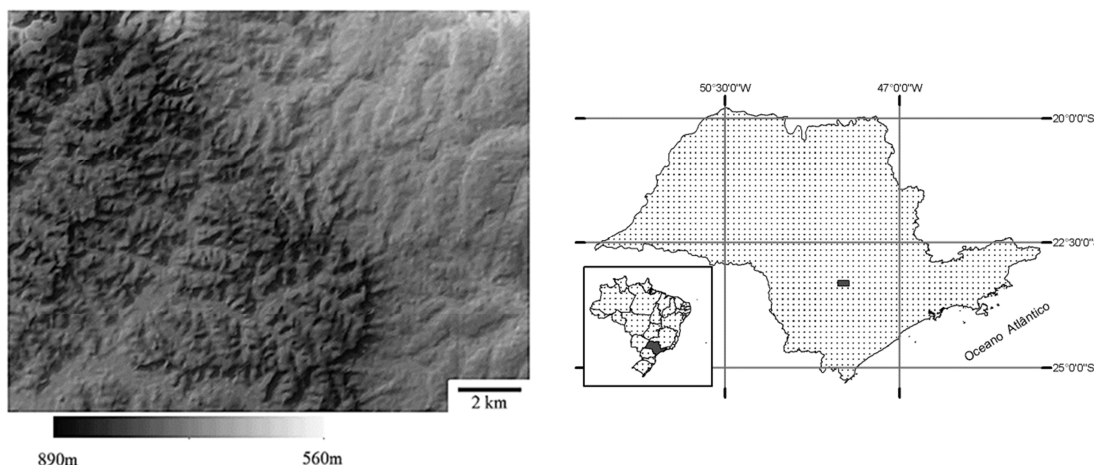
De fato, a extração de redes de drenagem carece de padronizações metodológicas, visto a permanência de aspectos ainda subjetivos na sua execução, sobretudo em relação aos limiares usados para definição do início do canal (Stanislowski, 2015). Particularmente em análises sobre dissecação topográfica, os métodos de extração baseados no fluxo hidrológico, limiar de área de contribuição (Schumm, 1973, 1977; (O'Callaghan e Mark, 1984) e de declividade (Montgomery e Dietrich, 1988, 1992; Montgomery e Foufoula-Georgiou, 1993; Moore et al., 1988a, b; Dietrich et al., 1992, 1993; Prosser e Dietrich, 1995), podem não necessariamente corresponder à variabilidade dos padrões de dissecação do terreno, resultando em uma densidade de drenagem espacialmente constante (Tarboton e Ames, 2001; Luo e Stepinski, 2008; Orlandini et al., 2011). Esta situação tem dificultado análises mais precisas visando mensurar a relação entre a rede de drenagem e o relevo, por exemplo padrões de drenagem e densidade de drenagem, assim como a aplicação de parâmetros morfométricos e aquisição de informações confiáveis, que possam corresponder a realidade observada em campo.

Em contrapartida aos problemas associados com a utilização dos critérios baseados em métodos hidrológicos, o raciocínio morfológico da curvatura topográfica de Peuker e Douglas (1975) tem sido aplicado como limiar para definição do canal (Band, 1986a, b; 1993; Howard, 1994; Rodriguez-Iturbe e Rinaldo, 1997, Tarboton e Ames, 2001; Heine et al., 2004; Molly e Stepinski, 2007; Valeriano, 2008) e demonstrado significativos avanços na caracterização da variabilidade espacial da dissecação topográfica a partir da rede de drenagem (Tucker et al., 2001; Stock et al., 2003; Luo e Stepinski, 2006, 2008). Dentro deste contexto, o trabalho destina-se a verificar a adequação do método de extração de drenagem baseado na curvatura topográfica, em comparação aos métodos de determinação de iniciação do canal baseados na área de contribuição e área de declividade de área, quanto a sensibilidade em expressar a variabilidade dos padrões de dissecação da paisagem.

Em uma área de marcante contraste entre unidades geomorfológicas, as drenagens foram analisadas utilizando-se a relação inversa entre a densidade de drenagem e o comprimento da vertente (Tucker et al., 2001). Nossa hipótese inicial é de que a dispersão dos

valores de comprimento da vertente reflita as diferenças na variabilidade dos padrões de dissecação expressos pelos métodos de extração de drenagem testados.

## 2. Área de Estudo



**Figura 1.** Localização da área de estudo. Contato entre duas províncias geomorfológicas do Estado de São Paulo, Planalto ocidental e Depressão Periférica. É possível notar o marcante contraste entre os padrões de dissecação no município de Guareí.

A área utilizada para o teste fica localizada entre os municípios paulistas de Pedra da Torre e Guareí, correspondente a carta topográfica SF-22-Z-D-III-4. A grade de elevação mostra dois setores que podem ser individualizados com clareza, evidenciados pela escarpa de significativa amplitude altimétrica, que caracteriza a transição entre duas províncias geomorfológicas do Estado de São Paulo, o Planalto Ocidental e a Depressão Periférica (Dias Ferreira, 1979: 4).

## 3. Metodologia

A partir do modelo de elevação SRTM, de resolução espacial de 1 arc-segundo, foram extraídas automaticamente três drenagens, utilizando três diferentes limiares para iniciação do canal. A primeira utilizando um limiar constante de área de contribuição para determinação do canal  $A_a$ , gerado de uma matriz de direção de fluxo D8 (O'Callaghan, e Mark, 1984). A segunda drenagem  $A_d$ , teve o fluxo acumulado gerado por uma matriz de múltiplas direções (Holmgren, 1994) e a drenagem extraída utilizando o limiar de declividade de Montgomery e Fofoula-Georgiou, (1993). Por último, a drenagem  $A_k$ , também originada de uma grade de múltiplas direções de fluxo foi extraída a partir de um limiar de iniciação do canal baseado na curvatura dos vales, aqui representada pela curvatura tangencial  $k_t$ .

As principais idéias são: (i) iniciar a área de drenagem a montante apenas quando uma convergência é denotada e (ii) forçar a passagem do fluxo para pelas áreas de convergência detectadas através da curvatura dos vales. Para alcançar a conexão, integramos a curvatura dos vales como fator de ponderação da acumulação de fluxo. Geralmente o fluxo de acumulação depende apenas da grade de direção do fluxo, mas ao considerar a morfologia do terreno, a acumulação de fluxo é ponderada pelos valores significativos curvatura dos vales. Consequentemente, as células com um valor de acumulação que não zero tornam-se parte da rede. Células que têm um valor de acumulação igual a zero são cortadas da rede, pois isso representa áreas sem concavidade. Este método difere acúmulo usual, que necessita da aplicação de apenas um limiar de área contributiva para delinear uma rede.

### **3.1.Método Hidrológico**

#### **3.1.1. Fluxo Acumulado**

Na maioria dos algoritmos implementados a extração de drenagens segue três principais passos: (i) determinação da direção do fluxo; (ii) cálculo da acumulação de fluxo; (iii) e delineação da rede utilizando um único limiar de área contributiva (Ac). O conceito de acumulação de fluxo permite a geração de um caminho de fluxo contínuo, na forma de uma rede. As direções de fluxo foram calculadas geração das matrizes de direção fluxo foram utilizados os algoritmos MFD, *Multiple flow direction* (Holmgren, 1994) e D8, para posterior comparação.

Seja qual for o algoritmo escolhido, a grade de elevação precisa ser preenchida antes da direção de fluxo ser calculada, para que se obtenha um fluxo contínuo (Martz e Garbrecht, 1999, Planchon e Darboux, 2001) ou o percurso de fluxo pode ser interrompido. Para todas as drenagens geradas a grade de elevação foi submetida ao processo de preenchimento das depressões fechadas (Wang e Liu, 2003), a fim de reparar falsos exutórios na área estudada.

Com exceção da grade de acumulação gerada pelo algoritmo de direção de fluxo D8, foi aplicado o limiar de iniciação do canal de Montgomery e Fofoula-Georgiou (1993), onde é atribuído à grade de acumulação uma área de contribuição de fluxo variável em função da declividade local. Tanto na grade de acumulação ponderada pela curvatura, quanto na grade MFD foi aplicado o mesmo limiar de iniciação 2 para o ‘expoente de Montgomery’, segundo a equação

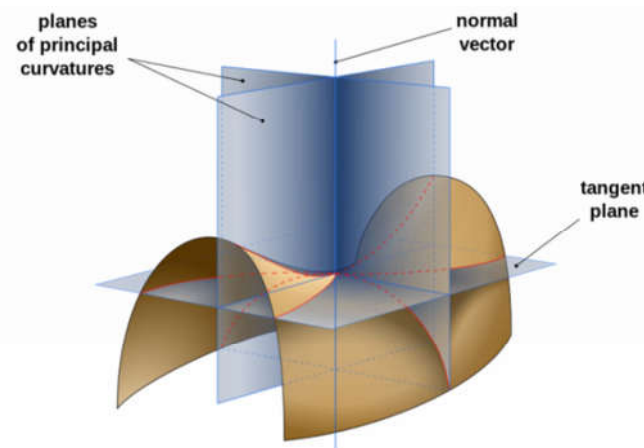
$$\text{Limiar de iniciação do canal} = \text{Tan (declividade local)}^{\text{mexp}}$$

### 3.2. Morfológico

#### 3.2.1. Curvatura Tangencial

Analogamente ao plano horizontal, Krcho, (1973, 1991) destacou a medição da curvatura a partir de um plano normal, perpendicular a direção do gradiente de declividade, tratada aqui como curvatura tangencial ou  $K_t$ . Essa abordagem tem-se demonstrado mais apropriada para análises de (convergência e divergência de fluxos, medindo a relação existente entre a direção do gradiente de declividade e a mudança do ângulo de orientação das vertentes. É calculada através da equação geral da reta tangente a curva (Rektorys, 1969). para uma função de elevação  $z = f(x, y)$ , sendo:)

$$k_t = \frac{f_{xx}f_y^2 - 2f_{xy}f_xf_y + f_{yy}f_x^2}{(f_x^2 + f_y^2)\sqrt{1 + f_x^2 + f_y^2}} \quad (1)$$



**Figura 2.** Plano horizontal e vertical de curvatura

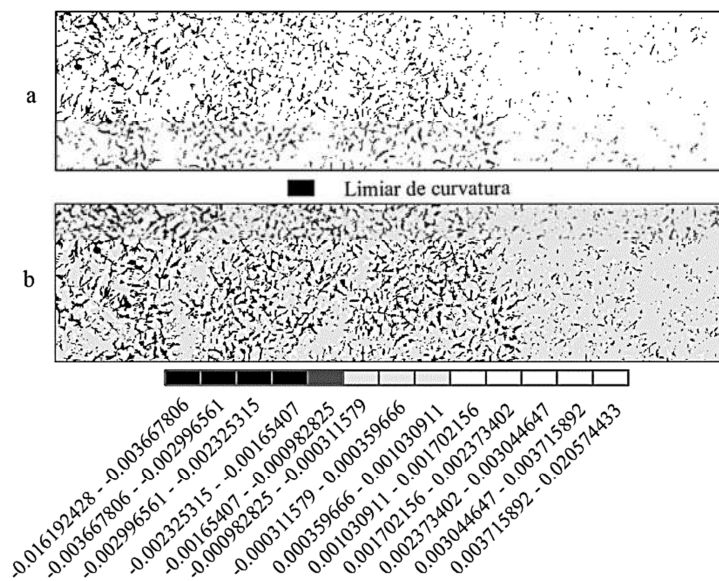
A amplitude dos valores de  $k_t$  é muito pequena, com distribuição muito próxima a zero, dividindo as curvaturas entre côncavas, referente a forma dos vales, convexas, para vertentes difusas (fluxo divergente) e planar. Devido nosso interesse apenas nas curvaturas côncavas e sabendo que áreas verdadeiramente planas são pouquíssimo prováveis na superfície real, estando em maior parte relacionadas a imprecisões do MDE (Mitasova e Hofierka, 1993), para efeito prático, preferimos tratá-las como áreas de transição entre superfícies côncavas e convexas.

A grade com os valores de  $k_t$  foi gerada com o algoritmo de Mitasova e Mitas, (1993) em uma janela móvel 3x3, onde  $k_t < 0$  em áreas onde o fluxo é convergente (vales) e  $k_t > 0$  em áreas onde o fluxo é difusivo (vertentes e divisores). Um limiar de declividade de 0,01% foi utilizado para definir áreas planas. Devido à amplitude extremamente baixa dos valores de  $k_t$  encontrados, 0,037, optou-se pelo armazenamento e processamento dos dados a partir de uma imagem tiff no formato Float 32 bits, com o objetivo de minimizar flutuações nos valores em decorrência de arredondamentos durante os cálculos e processamentos realizados. De maneira geral, a codificação e manipulação dos dados de curvatura em geral, exige um elevado nível de detalhamento (Valeriano e Carvalho Júnior 2003), consequentemente demandando um maior espaço de armazenamento.

Os valores da grade  $k_t$  foram então analisados através de manipulações do histograma da imagem, tendo como referência a hidrografia da carta topográfica na escala 1:50.000. Diversos intervalos foram testados para a seleção de um limiar que representasse a rede formada pelos vales, com maior ênfase aos drenos de ordem inferior, de maneira que os valores selecionados exprimissem em maior grau as características locais de variabilidade espacial da curvatura (Valeriano, 2008). Após sucessivos testes os dados foram classificados em 13 intervalos, considerando a distância de  $\frac{1}{2}$  desvio padrão da média. Com o auxílio das curvas de nível da carta topográfica foi definido o intervalo de -0,016192428 a -0,00165407 como limiar de curvatura crítico para a instauração dos canais de drenagem

A grade  $k_t$  foi então segmentada pelo processo de limiarização com base no intervalo de curvatura definido. A imagem binária resultante consiste em padrões de pixels côncavos representando um sistema de vales (Figura 2) constituído de muitos fragmentos desconectados, que por si só, não corresponde à morfologia da rede de drenagem.

De fato, o intervalo selecionado inclui incisões e cicatrizes, que dependendo da abordagem hidrológica podem não ser considerados como rios. Tratando-se de uma análise dos padrões de dissecação, os vales não canalizados têm importante significado geomorfológico, em particular nas assinaturas de oscilações climáticas (Dietrich and Dunne, 1993; Rinaldo et al., 1995; Tucker, 1996; Tucker and Slingerland, 1997). Para nós a designação drenagem será tratada como todo fluxo canalizado de água pluvial, seja ele efêmero, intermitente ou perene.



**Figura 3.** Limiar de curvatura. a) Intervalo de curvatura tangencial selecionado para representar as formas de vales. b) Grade de curvatura tangencial classificada em morfologias.

No entanto, padrões de células de grade curvas localmente para cima são desconectados e não facilmente acessível à análise de rede. Ligamos as células de grade curvas para cima usando-as como Campo de ponderação em um cálculo ponderado da área de drenagem. Em seguida, utilizamos um limiar neste Área de drenagem para mapear e delinear canais.

### 3.3.Reclassificação

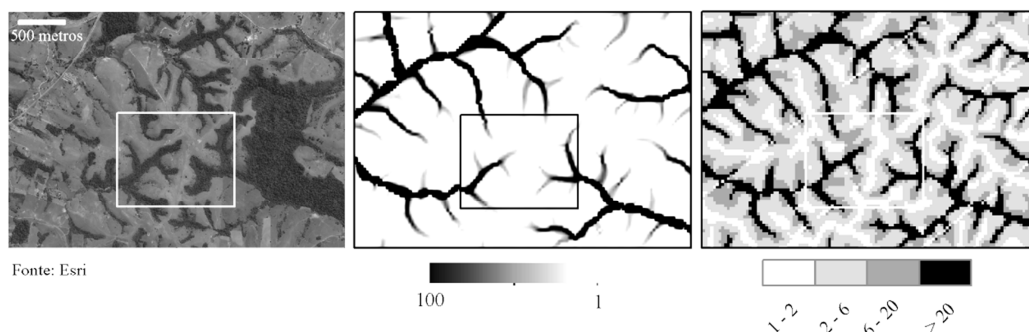
Para que os pixels de curvatura dos vales fossem estruturados em uma rede optou-se pelo roteamento das células a partir de um modelo hidrológico, semelhante ao que foi proposto por Tarboton e Ames (2001). Esse método consiste Dessa forma é possível assegurar a continuidade do fluxo e garantir a consistência hidrológica da rede formada pelos vales. Para tanto os valores de  $k_t$  foram reclassificados.

Foi estabelecido como condição que os valores utilizados como peso não superestimassem células de baixa acumulação de fluxo, de maneira a evitar ruídos na drenagem, principalmente nas áreas mais planas. Para isso foram tomados os valores mínimos de fluxo acumulado (cabeceira) com base nas áreas mais dissecadas, considerando uma rede de drenagem arbitrariamente definida pela segmentação da grade de acumulação, aplicando um realce de  $\frac{1}{2}$  desvio padrão ( $\min a_{cc} - \text{relevo dissecado}$ ).

Com o auxílio de imagens de alta resolução do servidor do próprio software, foram definidos valores significativos para acumulação de fluxo de acordo com a fotointerpretação



das drenagens. Na figura (3) verifica-se em relação às classes separadas pela fotointerpretação, divisores topográficos no intervalo entre 1 e 2 para o fluxo acumulado. As drenagens são representadas em valores de fluxo acumulado  $> 20$ , enquanto que valores intermediários foram classificados como áreas onde há certa confusão entre vertentes (2-6) e áreas de cabeceiras de drenagem.



**Figura 4.** Imagem de alta resolução do servidor Esri do ArcGis 10.1. Na sequência: (i) grade de acumulação de fluxo com detalhe para cabeceiras de drenagem com valores de acumulação de fluxo no intervalo de 1 a 100; (ii) Classificação da matriz de fluxo acumulado a partir da fotointerpretação das drenagens. A classificação divide a grade em divisores topográficos, vertentes, áreas de cabeceiras e drenagens, seguindo respectivamente do menor para o maior intervalo de valores de acumulação de fluxo definidos pela fotointerpretação.

Os valores de curvatura referentes ao sistema de vales, separados na etapa anterior de limiarização, foram então reclassificados para 20, seguindo a fotointerpretação das drenagens na matriz de fluxo acumulado. Dessa forma, o intervalo de curvatura para os vales assume valores onde a acumulação de fluxo é significativa para exprimir as drenagens, com ênfase nas drenagens de ordem inferior e áreas de cabeceiras.

### 3.4. Ponderação do fluxo acumulado

A grade contendo o fluxo acumulado pesado pela forma dos vales foi gerada a partir de uma operação aritmética de soma de bandas, entre a grade de curvatura reclassificada e a grade de acumulação de fluxo. As drenagens foram extraídas para as matrizes de acumulação de fluxo D8, MFD e morfologia dos vales, utilizando um mesmo limiar de área de contribuição para o canal.

### 3.5. Densidade de drenagem e comparação dos resultados

Inicialmente as redes de drenagens geradas foram sobrepostas e analisadas visualmente, tendo como referência a hidrografia da carta topográfica 1:50.000. Imagens de alta resolução espacial do servidor de imagens do próprio software SIG foram de grande utilidade nessa

etapa do trabalho e permitiram verificar com detalhe a influência das propriedades locais adicionadas aos modelos hidrológicos testados, declividade, área e curvatura.

Posteriormente à análise qualitativa, procedeu-se a avaliação numérica dos resultados, baseada na densidade de drenagem  $D_d$ . O cálculo da  $D_d$  se deu em função da distância  $L_0$  percorrida da encosta (comprimento de vertente) até a rede de drenagem. Isso é possível porque a  $D_d$  e o comprimento da vertente possuem dimensões fisicamente inversas (Horton, 1932) dada pela relação:

$$L_0 = (2D_d)^{-1} \quad (2)$$

Essa abordagem é particularmente interessante à comparação numérica da variabilidade espacial da  $D_d$ . Enquanto a  $D_d$  é convencionalmente calculada por uma média em função da área amostrada, portanto dependente espacialmente, neste caso a  $D_d$  é definida individualmente célula x célula, apresentando propriedades localmente variáveis (Tucker et al., 2001).

A distância  $L_0$  foi calculada pelo de algoritmo de Conrad (2001), onde através da grade de direção fluxo é traçado um percurso aleatório de maior gradiente de declividade até atingir um canal. A distância  $L_0$  foi calculada para todas as drenagens testadas e os resultados foram analisados quanto a dispersão dos dados em torno do seu valor médio, de maneira que quanto menos dispersos, mais homogêneos os valores de  $D_d$  e menor o contraste entre os diferentes padrões de dissecação da área.

#### **4. Resultados e Discussão**

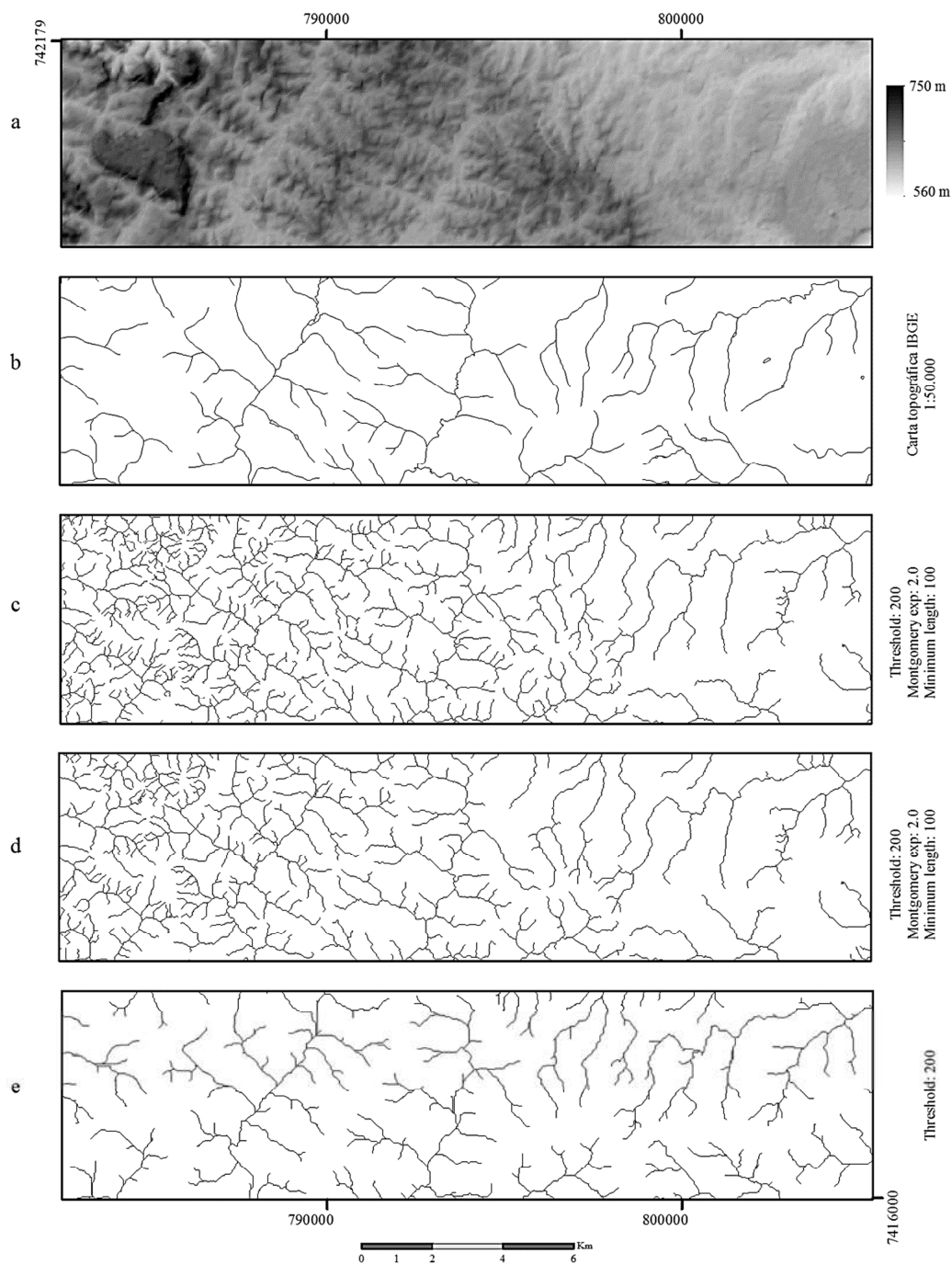
A comparação do aspecto visual das drenagens geradas é apresentada na figura 2. Os resultados diferenciaram notoriamente drenagens extraídas usando limiares de área de contribuição fixa e variável. Qualitativamente os resultados revelaram a sensibilidade dos métodos de extração testados, quanto à capacidade de expressar a variabilidade espacial das características do terreno. Os métodos que envolveram limiares de contribuição ponderados por parâmetros locais (declividade e curvatura), apresentaram os resultados mais satisfatórios, sendo possível diferenciar a partir das drenagens, o gradiente entre os compartimentos do relevo.

A hidrografia da carta topográfica, a pesar de correntemente utilizada para análises da variabilidade espacial da densidade de drenagem (Hiruma & Ponçano, 1994; Hartwing & Riccomini, 2010 Volkmer et al., 2010; Couto et al., 2011), não permitiu identificar o contraste

entre os padrões de dissecação da área. Contudo, o uso de hidrografias oriundas de cartas topográficas para esta finalidade é alvo de problematizações já algum tempo (Morisawa, 1957). A subjetividade do operador na restituição ou ao contornar as crenulações, além das generalizações cartográficas adotadas na edição dos mapas são destacadas por Shumm (1997). Outra questão não menos importante é referente a variabilidade temporal da densidade de drenagem, em relação a época climática da aquisição das fotografias aéreas (úmido/seco), que na prática inviabiliza a compilação/adensamento dos produtos de mapeamentos sistemáticos para grandes áreas. Na tabela 3 são apresentadas as variáveis morfométricas das redes de drenagens extraídas automaticamente em comparação à hidrografia da carta topográfica 1:50.000.

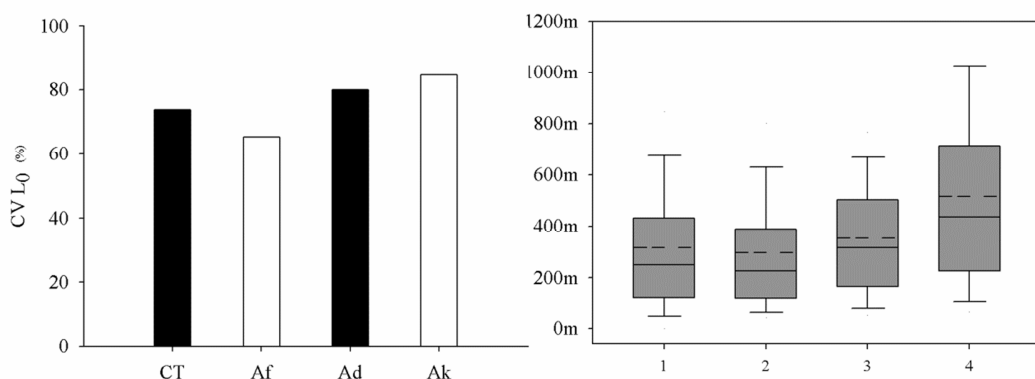
<b>Parâmetros</b>	<b>D8</b>	<b>Carta Topográfica</b>	<b>Iniciação do canal</b>	<b>Curvatura dos vales</b>
Ns	771	749	1500	2007
Ct	434,762	319,601	638,22	736,462
Média L0	296,157	515,930	335,895	296,157
Dp L0	229,924	379,85	268,762	251,131

**Tabela 1.** Parâmetros morfométricos das drenagens extraídas automaticamente.



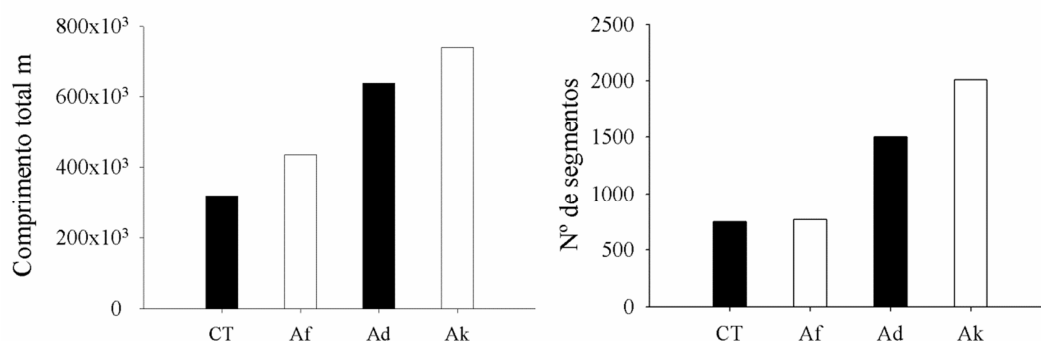
**Figura 5.** Comparação entre as drenagens extraídas automaticamente e a carta topográfica com os padrões de dissecação apresentados pelo modelo de elevação. a) SRTM + relevo sombreado (270°). b) Hidrografia da Carta Topográfica 1:50.000. c) Drenagem extraída com algoritmo *Multiple flow direction* MFD (Holmgren, 1994) e área de contribuição ponderada pelo limiar de curvatura dos vales (Método morfológico. d) Drenagem extraída utilizando o algoritmo MFD e área de contribuição ponderada pela declividade local. e) Drenagem extraída com algoritmo D8 e área de contribuição fixa.

A análise da dispersão dos valores de  $L_0$  confirmou a expectativa, permitindo caracterizar as diferenças entre as drenagens em relação a complexidade dos padrões de relevo da área sugerida para o teste. O coeficiente de variação CV foi usado para comparar o grau de dispersão dos valores de  $L_0$ , coincidindo com a análise qualitativa e os demais parâmetros morfométricos. Verificou-se que quanto menor a dispersão dos valores de  $L_0$ , mais homogênea é a densidade de drenagem da rede e menor a sua conformação com as características de dissecação da área.



**Figura 6.** Coeficientes de variação CV do comprimento das vertentes para as diferentes drenagens extraídas automaticamente mais a hidrografia da carta topográfica 1:50.000. Carta topográfica CT; Área de contribuição fixa Af; Área de contribuição ponderada pelo limiar de declividade Ad; Área de contribuição ponderada pela curvatura dos vales (método morfológico). Observou-se que quanto menor a dispersão dos valores de  $L_0$ , ou seja, menor CV, mais homogênea é a densidade de drenagem, respectivamente 1,2,3,4.

O menor coeficiente de variação 0,653 é referente à rede de drenagem de limiar de área fixo e direção de fluxo pelo algoritmo D8. Esta rede resultou em uma densidade de drenagem espacialmente constante, não havendo conformação com o contraste entre os padrões de dissecação. Em comparação com os outros métodos, a principal diferença se deu na omissão de canais de ordem inferior na parte mais dissecada da área, confirmado também pelo número de segmentos, bastante inferior aos demais métodos. Para a rede gerada com o limiar de área fixo o número de segmentos foi de 771, contra 2007 na rede gerada utilizando a curvatura.



**Figura 7.** Comparação entre o comprimento total das redes de drenagens e número de segmentos. CT; Área de contribuição fixa Af; Área de contribuição ponderada pelo limiar de declividade Ad; Área de contribuição ponderada pela curvatura dos vales (método morfológico).

Tais fatos corroboram com as limitações levantadas por outros autores (Tarboton e Ames, 2001; Molloy & Stepinski, 2007) a respeito do limiar de área fixo, por não considerar nenhuma informação que diferencie a área de contribuição necessária para estabelecimento de um canal quanto as características locais de permeabilidade do terreno. Diferentemente desta abordagem, a iniciação do canal e consequentemente a densidade de drenagem são governadas localmente em função dos processos de migração e acúmulo de água, minerais e matéria orgânica no solo através da superfície, proporcionados pela gravidade (Kirby e Chorley 1967; Dune, 1980 apud Montgomery e Dietrich, 1989; Dietrich et al., 1986).

Nas redes que utilizaram como limiar uma área de contribuição variável, apesar de mais semelhantes no aspecto visual em geral, obtendo boa conformação com o gradiente de dissecação, a análise dos parâmetros morfométricos permitiu caracterizar diferenças significativas entre as drenagens. Tanto o número de segmentos, quanto o comprimento total da rede foram significativamente maiores para a rede em que a área de contribuição foi ponderada pela curvatura (ver tabela).

A principal diferença se deu em função da omissão e do menor comprimento dos canais sob relevo mais movimentado, principalmente onde a dissecação é intermediária, transição entre a área soerguida que sustenta o município de Pedra da Torre e a planície logo abaixo. Isso possivelmente se deve ao fato da curvatura apresentar um grande detalhamento em sua distribuição espacial (forte caráter local), podendo uma única vertente compreender toda gama possível de curvaturas horizontais (Valeriano, 2008),

O coeficiente de variação da distancia L0 seguiu a ordem crescente dos outros parâmetros, maior para drenagem que contou com a curvatura dos vales 0,8452 em comparação com o

limiar de declividade 0,7973. A maior dispersão  $L_0$  correspondeu a um número maior de padrões de dissecação, possibilitando facilmente o reconhecimento de três ou quatro padrões de densidade de drenagem. Nesse sentido pode-se destacar que na rede de drenagem que utilizou a curvatura permitiu uma melhor diferenciação dos compartimentos fisiográficos e a identificação feições estruturais que não são evidentes na rede que utilizou a declividade como peso para a acumulação de fluxo.

## 5. Conclusões

Embora se reconheça a existência de variáveis que possam interferir no resultado final a respeito da resolução dos dados de altimetria e da escala de trabalho e dos limiares adotados, os resultados revelaram a sensibilidade dos métodos de extração testados, quanto à capacidade de expressar a variabilidade espacial das características do terreno. Os métodos que envolveram limiares de contribuição ponderados por parâmetros locais (declividade e curvatura), apresentaram os resultados mais satisfatórios, sendo possível diferenciar a partir das drenagens, o gradiente entre os compartimentos do relevo. Outras considerações:

Foi possível através do modelo de elevação SRTM de resolução espacial de 30m extrair automaticamente boa parte dos canais de primeira ordem em escala de terreno.

O intervalo empiricamente sugerido garantiu a consistência da segmentação da curvatura, evitando o surgimento ruídos associados a valores muito próximos de zero na transição côncavo-convexo das áreas planares.

Verificou-se que quanto menor a dispersão dos valores de  $L_0$ , mais homogênea é a densidade de drenagem da rede e menor a sua conformação com as características de dissecação da área.

Na rede de drenagem gerada com o limiar de área de contribuição fixo para o fluxo acumulado não houve conformação o gradiente de dissecação da área de estudo.

A rede de drenagem que utilizou a curvatura como limiar teve um melhor desempenho ao permitir uma melhor diferenciação dos compartimentos da paisagem a partir da variabilidade espacial da densidade de drenagem.

Considerando a dimensão do gradiente de dissecação do terreno, abre-se margem para questionamentos quanto o uso das cartas topográficas 1:50000 em estudos sobre a distribuição espacial da  $D_d$ .

## 6. Referências

- Ansan, V., N. Mangold, P. Masson, E. Gailhardis, and G. Neukum (2008), Topography of valley networks on Mars from Mars Express High Resolution Stereo Camera digital elevation models, *J. Geophys. Res.*, 113, E07006, doi:10.1029/2007JE002986
- Band, L. E., A terrain-based watershed information system, *Hydrol. Processes*, 3, 151-162, 1989.
- Band, L. E., Analysis and representation of drainage basin structure with digital elevation data, in *Proceedings of the Second International Conference on Spatial Data Handling*, pp. 437-450, Int. Geogr. Union, Williamsville, N.Y., 1986a.
- Band, L. E., Topographic partition of watersheds with digital elevation models, *Water Resour. Res.*, 23(1), 15-24, 1986b.
- Band, L.E. (1993): Extraction of Channel Networks and Topographic Parameters from Digital Elevation Data. En *Channel Network Hydrology* (K. Beven y M.J. Kirkby, ed.), 13-42.
- Barták, V. (2009). How to extract Rivers networks and catchment boundaries from DEM: a review of digital terrain analysis techniques. **Journal of Landscape Studies**, v. 2, n. 1, p. 57-68, 2009.
- Bishop, M.P.; James, L.A.; Shroder Jr, J.F.; Walsh, S.J. Geospatial technologies and digital geomorphological mapping: Concepts, issues and research. **Geomorphology** 137 (2012). p. 5-26
- Christofoletti, A. Geomorfologia. São Paulo: Edgar Blücher, 1980.
- Dalla Fontana, G. and Marchi, L.: Slope-area relationships and sediment dynamics in two alpine streams, *Hydrol. Process.*, 17(1), 73-87, 2003.
- Dietrich, W.E. & Dune, T. 1993. The channel head. In: Beven, K. & Kirkby, M.J. (eds.), *Channel Network Hydrology*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, pp: 175-219
- Dietrich, W.E. Wilson, C. Montgomery, D. & McKean, J. 1993. Analysis of erosion thresholds, channel networks and landscape morphology using a digital terrain model. *Journal of Geology*, 101, pp: 259-278.
- Dunne, T., 1980. Formation and controls of channel networks. *Progress Phys. Geogr.* 4, 211-239.
- Freeman, GT, 1991: Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid', *Computers and Geosciences*, 17:413-22.
- Gardiner, V., Gregory, K.J., Walling, D.E., 1977. Further notes on the drainage density-basin area relationship. *Area* 9, 117-121. Gregory, K.J., Gardiner, V., 1975. Drainage density and climate *Z. Geomorphol. N.F.* 19, 287-298.
- Hancock, G.R. & Evans, K.G. 2006. Channel head location and characteristics using digital elevation models. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31, pp: 809-824
- Heine, R.A. Lant, C.L. & Sengupta, R.R. 2004. Development and comparison of approaches for automated mapping of stream channel networks. *Annals of the Association of American Geographers*, 94(3), pp: 477-490.



Holmgren, P. (1994). Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models: An empirical evaluation. **Hydrological Processes** Vol 8(4), pp 327-334. DOI: 10.1002/hyp.3360080405

Horton, R.E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society of America Bulletin**, v. 56, p. 275-370, 1945.

Horton, R.E., 1945. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geol. Soc. Am. Bull.* 56, 275–370.

Howard, A.D. Drainage analysis in geologic interpretation: A summary. *AAPG Bulletin*, v. 51, p. 2246-2259, 1967.

Howard, A.D., 1994. A detachment-limited model of drainage basin evolution. *Water Resour. Res.* 30, 2261–2285.

Howard, A.D., 1997. Badland morphology and evolution: interpretation using a simulation model. *Earth Surf. Processes Landforms* 22, 211–227.

Ignacio Carlos Maestro Cano . Impacto del algoritmo D(infinito) en la extracción automática de redes de drenaje a partir de modelos digitales de elevaciones. Cuaternario y geomorfología: Revista de la Sociedad Española de Geomorfología y Asociación Española para el Estudio del Cuaternario, ISSN 0214-1744, Vol. 19, Nº. 1-2, 2005, págs. 23-33

Ijjasz-Vasquez, E. J., and R. L. Bras, Scaling regimes of local slope versus contributing area in digital elevation models, *Geomorphology*, 12, 299–311, 1995.

Kirkby, M.J., 1987. Modelling some influences of soil erosion, landslides and valley gradient on drainage density and hollow development. *Catena Suppl.* 10, 1–14.

Krcho, J., 1973, Morphometric Analysis of Relief on the Basis of Geometric Aspect of Field Theory: *Acta UC, Geogr. Physica* 1, Bratislava, SPN.

Krcho, J., 1991, Georelief as a Subsystem of Landscape and the Influence of Morphometric Parameters of Georelief on Spatial Differentiation of Landscape-Ecological Processes: *Ecology/ CSFR/*, v. 10, p. 115-157. Luo, W., and Stepinski, T. (2008), Identification of geologic contrasts from landscape dissection pattern: An application to the Cascade Range, Oregon, USA, *Geomorphology*, 99, 90–98

Luo, W., Stepinski, T.F., 2006. Topographically derived maps of valley networks and drainage density in the Mare Tyrrhenum quadrangle on Mars. *Geophysical Research Letters* 33. doi:10.1029/2006GL027346.

Madduma Bandara, C.M., 1974. Drainage density and effective precipitation. *J. Hydrol.* 21, 187–190.

Marco Cavalli, Sebastiano Trevisani, Beatrice Goldin<sup>1</sup>, Elena Mion, Stefano Crema and Ruggero Valentini Semi-automatic derivation of channel network from a high-resolution DTM: the example of an Italian alpine region. *European Journal of Remote Sensing* - 2013, 46: 152-174 doi: 10.5721/EuJRS20134609

Merritts, D. & Hesterberg, T. Stream networks and longterm surface uplift in the New Madrid seismic zone. *Science*, v. 265, p. 1081-1084, 1994

Metz M., Mitasova H., Harmon R. (2011). Efficient extraction of drainage networks from massive, radar-based elevation models with least cost path search, **Hydrol. Earth Syst. Sci.** Vol 15, 667-678

Minár, J. & Evans, I. A. Elementary forms for land surface segmentation: The theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. **Geomorphology** 95 (2008) p. 236–259.

Mitasova, H. and Mitas, L., 1993: Interpolation by Regularized Spline with Tension: I. Theory and Implementation, *Mathematical Geology* ,25, 641-655.

Moglen, G. E., Etahir, E. A. B. and Bras, R. L. (1998). ‘On the sensitivity of drainage density to climate change’, *Water Resources Research*, 34, pp. 855–862.

Molly, I. and Stepinski, T. F.: Automatic mapping of valley networks on Mars, *Computers & Geosciences*, 33, 728–738, 2007.

Montgomery, D. R., Dietrich, W.E. Source areas, drainage density, and channel initiation. *Journal of the American Water Resources Association*, Nova York, V. 25. p.1907-1918, 1989. Disponível em:  
<<http://rocky2.ess.washington.edu/grg/publications/pdfs/Source%20Areas,%20Drainage%20Density,%20Channel%20Initiation-Montgomery-Dietrich-WRR%201989.pdf>>

Montgomery, D.R. & Dietrich, W.E. 1992. Channel Initiation and the Problem of Landscape Scale. *Science*, 255, pp: 826-830.

Montgomery, D.R. & Foufoula-Georgiou, E. 1993. Channel network source representation using Digital Elevation Model. *Water Resources Research*, 29(12), pp: 3925-3934.

Montgomery, D.R., Dietrich, W.E., 1989. Source areas, drainage density and channel initiation. *Water Resour. Res.* 25, 1907–1918

Montgomery, D.R., Dietrich, W.E., 1989. Source areas, drainage density and channel initiation. *Water Resour. Res.* 25, 1907 1918.

Orlandini, S., Tarolli, P., Moretti, G., and Dalla Fontana, G.: On the prediction of channel heads in a complex alpine terrain using gridded elevation data, *Water Resour. Res.*, 47, W02538, doi:10.1029/2010WR009648, 2011.

Rana, Sanjay. Use of plan curvature variations for the identification of ridges and channels on DEM, In: A. Riedel, W. Kainz, G A. Elmes (eds), *Progress in Spatial Data Handling*, Springer-Verlag, 2006, In press.

Rodriguez-Iturbe, I. & Rinaldo, A. 1997. *Fractal river basins: chance and self-organization*, Cambridge University Press, U.K., 1997

Rodriguez-Iturbe, I., Rinaldo, A., 1997. *Fractal River Basins: Chance and Self-Organization*. Cambridge Univ. Press, New York.

Schumm, S.A., 1997, Drainage density: problems of prediction and application. In: Stoddart, D.R. (ed.), *Process and Form in Geomorphology*. Routledge, London, p. 15–45.

Sofia G., Tarolli P., Cazorzi F., Dalla Fontana G. (2011) - An objective approach for feature extraction: distribution analysis and statistical descriptors for scale choice and channel network identification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15 (5): 1387-1402.

- Stock, J., and W. E. Dietrich, Valley incision by debris flows: Evidence of a topographic signature, *Water Resour. Res.*, 39(4), 1089, doi:10.1029/2001WR001057, 2003.
- Strahler, A.N. Dynamic basis of geomorphology. *Geological Society of American Bulletin*, v. 63, p. 923-938, 1952. (a)
- Stuart W.D. Grieve,\* Simon M. Mudd1 and Martin D. Hurst. How long is a hillslope? *Earth Surf. Process. Landforms* (2016) DOI: 10.1002/esp.3884
- Suguio, K. & Bigarella, J.J. *Ambientes fluviais*. 2.ed. Florianópolis: Editora da UFSC/UFPR, 1990.
- Tarboton, D.G. Bras, R.L. & Rodriguez-Iturbe, I. 1991. On the extraction of channel networks from DigitalElevation Data. *Hydrologic Processes*, 5(1), pp: 81-100.
- Tarboton, D.R., Bras, R.L., Rodriguez-Iturbe, I., 1992. A physical basis for drainage density. *Geomorphology* 5, 59–76
- Tucker, G.E., Bras, R.L., 1998. Hillslope processes, drainage density and landscape morphology. *Water Resour. Res.* 34 Ž . 10 , 2751–2764.
- Valeriano, M. de M. Dados topográficos. In: Florenzano,T. G. **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. cap. 3, p. 72-104.
- Valeriano, M. M. TOPODATA: guia de utilização de dados geomorfométricos locais. Márcio de Morisson Valeriano. 2008. São José dos Campos: INPE, 2008. 44p; (INPE-0000-TDI/00). [http://www.dsr.inpe.br/topodata/data/guia\\_enx.pdf](http://www.dsr.inpe.br/topodata/data/guia_enx.pdf). Acesso em Setembro/2009.
- Willgoose, G.R., Bras, R.L., Rodriguez-Iturbe, I., 1991b. A physically based coupled network growth and hillslope evolution model: 2. Nondimensionalization and applications. *Water Resour. Res.* 27, 1671–1684.